

基于事件树分析的沉船碍航概率风险评估^{*}

邢 辉¹, 吕安勤², 周尊山², 于洪亮¹, 段树林¹

(1. 大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 山东海事局 研究中心, 山东 青岛 266002)

摘要: 基于事件树分析方法探索沉船碍航事故的发生过程和机理. 将通航船舶触碰沉船事故的发生分为两个阶段: 通航船舶要经过沉船区域; 通航船舶经过沉船区域时驶入碰撞航路并且未能有效避碰. 基于沉船碍航事件树分析, 建立沉船碍航概率风险评估模型. 结合海事科技的发展现状, 考虑模型参数的可获得性, 确保模型的实用性和可操作性. 模型应用结果表明, 该模型可迅速有效进行沉船碍航风险的定量评估, 评估结果与历史操作经验较吻合.

关键词: 沉船; 碍航; 概率风险评估; 事件树分析

中图分类号: U698.6

文献标志码: A

Shipwreck accident probabilistic risk assessment based on event tree analysis

XING Hui¹, LV Anqin², ZHOU Zunshan²,YU Hongliang¹, DUAN Shulin¹(1. Marine Engineering College, Dalian Maritime University,
Dalian 116026, China; 2. Research Center, Shandong Maritime
Safety Administration, Qingdao 266002, China)

Abstract: The process and mechanism of navigable vessels contacting with shipwreck were analyzed based on event tree analysis method. The event of navigable vessel contacting with shipwreck was divided into two phases: navigable vessels went through shipwreck field and then some navigable vessels got into collision route and collision avoidance failed for some reasons. Shipwreck accident probabilistic risk assessment model was established based on event tree analysis of shipwreck accident. Combining with the present status of marine science and technology development, the model was ensured to be practical and operational considering the availability of model parameters. The applied results of the proposed model show that the model can be used for quantitative shipwreck accident risk assessment quickly and effectively, which agrees with historical operational experience.

Key words: shipwreck; navigation obstruction; probabilistic risk assessment; event tree analysis

0 引言

随着水路运输的快速发展, 各种人为因素、设备故障或恶劣气象海况条件所致的沉船事故时有发生. 目前, 我国沉船管理方面的法律法规还不健全, 管理机制不够完善, 动辄数千万元的沉船打捞费用却找不到责任主体, 追偿困难^[1]. 因此, 本文试图从另一个角度寻找破解沉船管理难题的捷径, 探索由海事管理机构及地方政府引入风险管理理念, 建立沉船风险评估机制, 科学评价沉船碍航风险, 为海事管理机构科学处置沉船提供决策依据.

1 沉船碍航事件树分析

1.1 事件树分析

事件树分析是一种探究事故、失效或不希望出现事件的发展和演化方法^[2]. 任何一个事故都是由多环节事件发展变化形成的. 在事件发展过程中出现的环节事件可能有两种情况, 或者成功或者失败. 如果这些环节事件都失败或部分失败, 就会导致事故发生. 通过事件树分析, 可以把事故发生、发展过程直观展现出来. 如果在事件(隐患)发展的不同阶段采取恰当措施阻断其向前发展, 就可以达到预防事故发生的目的.

事件树分析的一般步骤:

(1) 确定初始事件. 初始事件是事件树中在一定条件下造成事故后果的最初原因事件.

(2) 确定环节事件. 找出出现在初始事件后一系列可能造成事故后果的其他原因事件.

^{*} 收稿日期: 2011-07-26

基金项目: 交通运输部海事局科研项目(2010-37)

作者简介: 邢 辉(1980—), 男, 湖北浠水人, 硕士, 讲师. E-mail: xingcage@163.com

(3)画事件树. 把初始事件写在最左边, 各个环节事件按顺序写在右边; 从初始事件画一条水平线到第一个环节事件, 在水平线末端画一垂直线段, 垂直线段上端表示成功, 下端表示失败; 再从垂直线段两端分别向右画水平线到下一个环节事件, 同样用垂直线段表示成功和失败两种状态; 依次类推, 直至最后一个环节事件.

(4)定性、定量分析.

1.2 沉船碍航机理

沉船对通航安全的影响在于通航船舶可能会触碰到沉船. 这种触碰是由于通航船舶不知沉船的存在, 或疏忽大意、瞭望失败、人员的错误行动、设备故障导致避碰行动失败等原因所致. 通航船舶离港驶向下一港口过程中, 触碰沉船的前提条件是该通航船舶要经过沉船区域, 并且在经过沉船区域时要行驶在碰撞航路上, 如图 1 所示. 驶入碰撞航路的通航船舶也并不必然触碰沉船, 它还会受到一些人为因素(避碰行动)或客观条件(沉船最高点至低潮海平面的距离, 本文定义为沉船富裕水深 H_M , 若沉船显露出水面, 记 $H_M=0$)的干预.

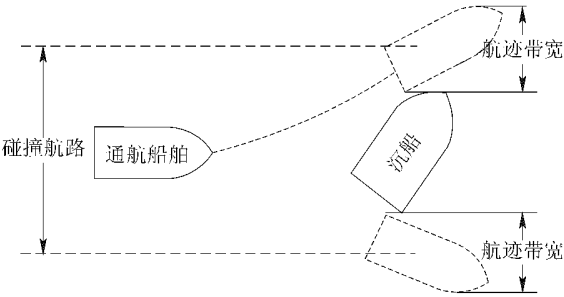


图 1 通航船舶经过沉船区域示意图

1.3 建立沉船碍航事件树

触碰事件的发生分为两个阶段: 通航船舶要经过沉船区域; 通航船舶经过沉船区域时驶入碰撞航路并且未能有效避让沉船.

在触碰事件发生的第一个阶段, 海事管理机构可以采取减少经过沉船区域的船舶数量. 目前主要有两种途径: 一是沉船发生后, 通过岸基无线电台、VHF(甚高频)等方式发布航行警告, 作为一种临时性的应急措施; 二是定期随着航海出版物的更新, 发布航行通告.

针对第一个阶段, 建立如图 2 所示的事件树, 用来描述通航船舶驶入沉船区域的发生过程. 事件树分析的顶事件是通航船舶自一港驶向另一港. 通航船舶驶入沉船区域的环节事件可表述为: 海事管理机构是否发布航行警告或航行通告; 通航船舶是否

已经由航行警告或通告获知沉船的存在; 通过前述途径获知沉船存在的前提下, 通航船舶是否预先计划了避让航线; 最后, 虽然采用了避让航线, 但有可能由于海上交通状况的限制、气象水文条件的影响或者导航定位设备的偏差等原因使避让航线失效.

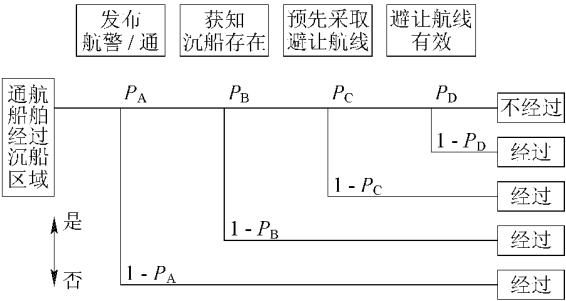


图 2 通航船舶经过沉船区域的事件树

针对第二个阶段, 建立如图 3 所示的事件树. 事件树分析的顶事件是通航船舶经过沉船区域. 通航船舶触碰沉船的环节事件可表述为: 沉船富裕水深是否足够通航船舶安全通航; 经过沉船区域的通航船舶是否驶入碰撞航路; 海事管理机构是否已设置了沉船标志或是沉船显露出水面能被明显地识别; 通航船舶驾驶台人员是否通过值班瞭望或是雷达监测注意到沉船; 通航船舶驾驶台人员是否及时采取了正确的避碰行动, 各种设备性能状况是否也在良好状态等等, 并最终确保避碰行动成功.

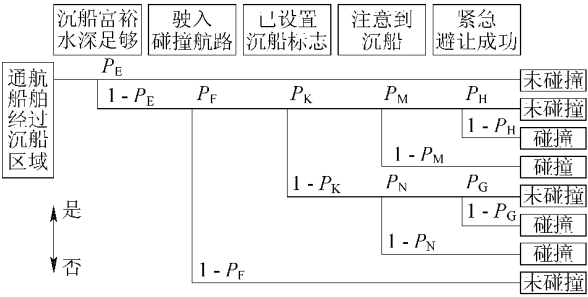


图 3 经过沉船区域的通航船舶触碰沉船的事件树

1.4 沉船碍航事件树定性分析

事件树分析中各环节事件的成功或失败概率如图 2、3 所示.

通航船舶经过沉船区域的概率可表示为

$$P_{passing} = 1 - P_A P_B P_C P_D \quad (2)$$

经过沉船区域通航船舶触碰沉船概率可表示为

$$P_{contact} = (1 - P_E) P_F (1 - P_K P_M P_H - P_N P_G + P_K P_N P_G) \quad (3)$$

因此, 对一艘按习惯航路可能经过沉船区域的通航船舶, 其触碰沉船概率可表示为

$$P_{CP} = P_{\text{passingby}} P_{\text{contact}} \tag{4}$$

海事管理机构采取的风险控制方案及相应方案下的通航船舶触碰沉船概率如表 1 所示。

表 1 不同风险控制方案下的通航船舶触碰沉船概率

沉船	风险控制方案		触碰概率
富裕水深	P_A	P_K	
$P_E = 1$	—	—	0
	0	0	$P_F(1 - P_N P_G)$
$P_E = 0$	1	0	$(1 - P_B P_C P_D) P_F(1 - P_N P_G)$
	1	1	$(1 - P_B P_C P_D) P_F(1 - P_M P_H)$

注: 1 表示控制措施成功; 0 表示控制措施失败

通过对表 1 中通航船舶触碰沉船的概率分析, 可以得出如下结论:

(1) 提高沉船被获知的概率 P_B , 可有效减少沉船的碍航风险。因此, 沉船事故发生后, 海事管理机构应该多途径、多渠道的发布沉船信息, 增加其被过往船只获知的概率。如通过岸基船舶交通服务系统(VTS)、海上公共广播频道发送沉船信息; 及时将沉船信息公告船公司、港务公司、船舶代理公司; 鼓励获知该沉船信息的船舶经过沉船附近区域时通告其他过往船舶注意; 如有必要, 海事管理机构还要派遣警戒船舶在沉船附近值守; 航海测绘部门及时更新并发布新版航海出版物; 而航运公司也应该及时采购最新版本的航海出版物并送达船舶上; 船上驾驶部主管人员也应该及时做好海图更正工作。

(2) 提高采取避让航线的可能 P_C , 并确保避让航线有效概率 P_D , 可有效减少通航船舶触碰沉船的风险。通航船舶获知沉船信息后, 船长和主管驾驶员应预先计划好航线, 不可心存侥幸, 应尽量远离沉船区域航行; 驾驶台相关的主管人员在日常保养中应做好航行设备的维护和校准工作。

(3) 通航船舶驶入碰撞航路的概率 P_F 主要由海上交通模式决定。在按习惯航路航行至沉船区域时, 驾驶台值班人员应加强瞭望, 并在接近该区域时提前改变航向, 驶离碰撞航路。

(4) 通航船舶在航行至沉船区域附近时, 通过加强值班瞭望或雷达观测提高注意到沉船的概率 P_M 或 P_N (P_N 仅针对显露于水面上的沉船), 并确保紧急避让成功的概率 P_H 或 P_G (P_G 亦仅针对显露于水面上的沉船), 可有效避免触碰沉船事故。在海上航行时, 驾驶台值班人员应确保有效的值班瞭望, 不得远离驾驶台、疏忽大意、睡觉或从事其他干扰值班的工作, 拒绝疲劳、酒精和毒品; 同时船长、驾驶员应加强避碰业务的培训和学习, 确保采取正确的避碰行动; 轮机部人员也应确保动力设备和航向保持设备

的可靠性和有效性。

2 沉船碍航概率风险评估模型

本文基于前述事件树的定性分析, 结合已有水路运输、海事事故的统计资料, 对各环节事件进行一定的简化和综合, 建立一个定量的、通用化的沉船碍航概率风险评估模型。

2.1 沉船富裕水深

根据表 1, 若具有足够的沉船富裕水深, 则通航船舶经过该沉船区域时无触碰风险。通航船舶所需要的安全通航水深按下式计算:

$$h_s = h + \Delta h \tag{5}$$

其中: h_s 为通航船舶安全通航水深(m); h 为通航船舶满载吃水(m); Δh 为通航船舶航行时安全富裕水深(m)。

依据典型船型尺度拟合出通航船舶满载吃水与吨位间的对应关系^[3]

$$h = 0.63DWT^{0.28} \tag{6}$$

其中, DWT 为通航船舶载重吨。根据文献[4], 取 $\Delta h = 20\%h$ 。

若通航船舶所需要的安全通航水深小于沉船富裕水深(即 $P_E = 1$), 则该类船舶可安全通航; 若通航船舶所需要的安全通航水深大于沉船富裕水深(即 $P_E = 0$), 则按后续方法进行概率风险评估。

2.2 建立沉船碍航概率风险评估模型

(1) 考察交通流量 N_{jk}

触碰事件发生的第一个阶段主要影响某一艘通航船舶经过沉船区域的概率, 或是经过沉船区域的通航船舶的数量(交通流量)。对一艘按习惯航路可能经过沉船区域的通航船舶, 其经过沉船区域的概率为 $(1 - P_A P_B P_C P_D)$ 。对各环节事件概率 P_A 、 P_B 、 P_C 、 P_D 的确定十分困难, 因此, 本文采用交通流量的概念, 通过现场观测船、岸基的监测雷达或监控 AIS 等手段, 可直接测得特定沉船区域第 k 条航路上第 i 类、第 j 吨级通航船舶的交通流量 N_{ijk} 。观测难点在于对不同类型、不同吨级通航船舶的区分。因此, 可结合沉船区域周围港口的分布以及抵、离港船舶类型和吨级的调查与统计, 对经过沉船区域的通航船舶类型和吨级进行简化并统计和预测其交通流量。

(2) 考察几何概率 $P_{G,k}$

在触碰事件发生的第二个阶段, 通航船舶驶入碰撞航路的概率 P_F 主要由海上交通模式决定。本文采用几何概率 $P_{G,k}$ 来描述第 k 条航路上通航船舶驶

入碰撞航路的概率. 对于开敞水域, 航路中没有特殊障碍物, 航迹线在航路上的横向分布服从正态分布^[5-8]. 因此, 几何概率可表示为

$$P_{G,k} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (7)$$

设航路宽度为 b_p , 沉船在航路横向方向占宽 b_L , 通航船宽 b_V , 通航船长 L_V . 纵坐标轴取在左侧航路边线, 正态分布中心位置 μ 假定是航路中心线, $\mu = b_p/2$, 取标准差 $\sigma = b_p/6$.

通航船舶经过沉船区域时, 要考虑风、流所致的横向漂移, 船舶的安全通航宽度应以航迹带宽度为计算基准. 根据文献[3], 取海上航路通航船舶航迹带宽为:

$$b = 1.45(L_V \sin 14^\circ + b_V) \quad (8)$$

根据文献[3] 提供的典型船型尺度, 拟合出通航船舶船长、船宽与吨位间的对应关系

$$L_V = 14.7 \text{ DWT}^{0.25} \quad (9)$$

$$b_V = 1.67 \text{ DWT}^{0.28} \quad (10)$$

沉船至纵坐标轴的距离为 d , $x_1 = d - (b + b_L)/2$, $x_2 = d + (b + b_L)/2$. 碰撞航路宽度等于通航船舶航迹带宽 b 与沉船占宽 b_L 之和.

(3) 考察避碰失效概率 P_{CA}

实际调查中发现, 显露于水面上的海上沉船出现的概率极低, 因此不考虑该情况, 记 $P_N = 0$. 若已设置沉船标志, 即表 1 中的 $P_K = 1$ 的情况, 定量评估中要考察注意到沉船概率 P_M 和紧急避让成功概率 P_H , 但 P_M 和 P_H 的确定目前仍缺乏足够的统计资料或可供使用的数据. 本文将触碰事件发生第二个阶段的最后两个环节事件合并考虑, 用避碰失效概率 P_{CA} 表示未注意到沉船或者注意到沉船但紧急避让失败的统计概率. 具体沉船处的避碰失效概率可以通过对该区域船舶事故资料的分析确定. 但由于船舶触碰沉船事故率较低, 一般情况下缺乏足够的资料, 因此常用船舶碰撞和搁浅的资料数据来确定避碰失效概率. 确定避碰失效概率时还应该对一些重要的影响因素进行修正, 包括风、流、能见度、船舶尺寸、交通密度、航路弯曲度、助航标志、VTS 系统等.

避碰失效概率^[8]

$$P_{CA} = P_{BR}(1 + \delta/90)(1 + v_s |\cos \rho|/10)(1 + 0.5 v_s |\sin \rho|)(1 + 1/r)(1 + v_f/10)R_D R_H \quad (11)$$

其中, P_{BR} 为基准避碰失效概率; δ 为航路弯曲度 ($0 \leq \delta \leq 90^\circ$); v_s 为常年主水流流速; ρ 为常年主水

流方向 ω 与航路方向 Φ 的夹角; r 为常年能见距离; v_f 为常年平均风速, 蒲氏风级; R_D 为船舶交通密度修正系数; R_H 为助航条件修正系数.

根据国内外一些水道的历史事故资料确定基准避碰失效概率^[5,8], 按船舶大小和船型分别取值在 $0.5 \times 10^{-4} \sim 6.3 \times 10^{-4}$. 本文按船长进行线性拟合, 取 $P_{BR} = 2 \times 10^{-6} L_V - 4 \times 10^{-5}$. 船舶交通密度修正系数可由沉船区域的交通密度水平确定: 低交通密度, $R_D = 1.0$; 中等交通密度, $R_D = 1.3$; 高交通密度, $R_D = 1.6$. 助航条件修正系数 R_H 取 $0.7 \sim 1$, 无助航条件 $R_H = 1$.

(4) 沉船碍航概率风险评估模型

基于前述分析, 通航船舶触碰沉船的期望次数可表示为

$$E_{(T)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l N_{ijk} P_{G,k} P_{CA} \quad (12)$$

其中: $E_{(T)}$ 为 T 年内撞击到沉船的船只数量; T 为年限, 通常取 1 年; N_{ijk} 为交通流量; $P_{G,k}$ 为几何概率; 若未设置沉船标志, 即 $P_K = 0$, 则 $P_{CA} = 1$.

3 模型应用

2007 年 7 月 19 日, “金华夏 158” 船在长山水道西入口浓雾中因碰撞沉没, 现场调研得到的基本模型参数如表 2 所示.

表 2 基本模型参数

模型参数	参数值	模型参数	参数值
$\delta/(^\circ)$	0	R_D	1.6
$v_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1	R_H	0.8
$\omega/(^\circ)$	320	b_p/m	4580
$\Phi/(^\circ)$	102 ~ 282	d/m	2400
r/km	10	b_L/m	90
$v_f/\text{级}$	6	H_M/m	13

应用本文建立的沉船碍航概率风险评估模型, 得到“金华夏 158” 船导致各吨级船舶的触碰概率, 如表 3 所示. 沉船富裕水深可确保 25800 DWT 以下船舶安全通航.

表 3 各吨级船舶的触碰概率

通航船舶吨级 /DWT	单船触碰概率
26 000	0.000108
50 000	0.000143
70 000	0.000164
100 000	0.000191
120 000	0.000207
150 000	0.000229
200 000	0.000259

(下转第 36 页)

表 3 南向原始验证数据拟合误差统计

误差	数量	百分比/%
< 10%	13	7.7
10% ~ 20%	14	8.3
20% ~ 50%	42	25
> 50%	99	58.9

表 4 南向均值化验证数据拟合误差统计

误差	数量	百分比/%
< 10%	3	20
10% ~ 20%	4	26.7
20% ~ 50%	4	26.7
> 50%	4	26.7

由表 1—4 可以看出,初步处理的 168 个数据的随机性较大,所以拟合误差的结果也较大;而在将数据进行均值化处理后,数据的随机性较弱,所以可得到较初步处理更小的拟合误差.故本文拟合公式只适用于大量、均值化处理之后的统计数据,而不适用

于只进行初步处理的、随机性较大的统计数据.

4 结 语

本文对船舶交通量和船舶速度的分布规律进行分析,通过数据拟合方法对二者关系进行研究,得出船舶交通量与船速之间的关系式,并用验证数据对拟合关系式进行验证.结果表明,本文研究方法对于大量统计处理数据效果较好.

参考文献(References):

[1] 俞洁,杨成斌. 交通流理论发展分析[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2004,27(2):163—167.
[2] 吴兆麟,朱军海. 海上交通工程[M]. 2 版. 大连:大连海事大学出版社,2004.
[3] 黄海鸥,李晓春. 航道交通流统计时间单位研究[J]. 科学技术与工程,2009,24(9):7568—7570.

(上接第 32 页)

根据 AIS 观测,长山水道(102°~282°)船长大于 200 m 船舶(相当于 35 000DWT)的月通过量为 50 艘次左右,而船长大于 300 m 船舶(相当于 170 000 DWT)的通航艘次为 0. 考虑到通航量的增长量,取平均吨级 100 000DWT 作为考察对象,可以预测:“金华夏 158”船导致的触碰事故期望约为 10 a/次. 该沉船风险等级较高,建议进行打捞清除. 这与该轮通过多次专家论证最终确定要予以打捞的评估结论是一致的.

4 结 论

(1) 运用事件树分析方法可以清楚了解沉船碍航事故的发生、发展过程. 通航船舶触碰沉船事故的发生分为两个阶段:通航船舶要经过沉船区域;通航船舶经过沉船区域时驶入碰撞航路并且未能有效避让沉船. 结合事件树的定性分析,在第一阶段海事管理机构采取风险控制措施(如发布航行警告和航行通告)减少经过沉船区域的船舶的数量,在第二阶段通过设立沉船标志增加沉船被获知的概率等方式,可有效阻断通航船舶触碰沉船事件的发生,达到预防事故的目的.

(2) 基于事件树分析方法开展沉船碍航机理分析,建立沉船碍航概率风险评估模型,并对模型参数

的确定方法予以说明. 将模型应用于我国水域历史沉船,可得出量化的评估结论,且与历史操作经验较吻合,验证了模型的实用性和可操作性. 该模型对于我国水域沉船的碍航风险评估、加强沉船管理、科学处置沉船、确保水上航行安全和畅通有一定的指导意义.

参考文献(References):

[1] 顾雨花. 沉船强制打捞法律制度研究[D]. 大连:大连海事大学,2009.
[2] 中国船级社. 综合安全评估应用指南[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
[3] 中华人民共和国交通运输部. 海港总平面设计规范(JTJ 211—99)[S]. 北京:人民交通出版社,1999.
[4] 曲径,韩晓宝,陈伟. 渤海超大型油轮安全保障研究[J]. 中国航海,2010,33(2):51—55.
[5] AASHTO. Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges[S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1994.
[6] 林铁良,王君杰,陈艾荣. 基于事故记录的船撞桥墩概率模型建立[J]. 同济大学学报:自然科学版,2007,35(2):181—186.
[7] 戴彤宇. 船撞桥及其风险分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2002.
[8] 王君杰,耿波. 桥梁船撞概率风险评估与措施[M]. 北京:人民交通出版社,2010.